

Comunicación AI-7

ESTUDIO DE LA SITUACIÓN DEL TORNADO DE SIGÜENZA DEL 24 DE MAYO DE 1993

Francisco Martín León

STAP del INM

Lucía de Esteban Jódar

Servicio de Predicción Numérica del INM

Ricardo Riosalido Alonso

STAP del INM

RESUMEN

Durante el día 24 de mayo de 1993 una parte de la Península Ibérica se vio afectada por cierta actividad convectiva. Un conjunto de tormentas llegó a organizarse en una estructura lineal afectando, en su momento de máxima actividad, a la provincia de Guadalajara. Una de las células que conformaban el sistema generó un tornado que sacudió a la ciudad de Sigüenza entre las 19:30-19:40 UTC. En este trabajo se van a analizar los datos disponibles de teledetección (satélite, radar y rayos) y el papel tan importante que desempeñan en este tipo de acontecimientos. Se estudiará la utilidad de los modelos conceptuales asociados a los fenómenos convectivos, su potencial uso para la comprensión de los procesos observados y la necesidad de ser adaptados a los entornos operativos de trabajo en función de las características de las herramientas empleadas.

1. Introducción

La predicción y aparición de la convección, tipo y fenómenos asociados, no es un hecho aislado ni en el espacio ni en el tiempo sino más bien el resultado de un conjunto de procesos que en cascada se dan en la atmósfera, que van desde la propia escala sinóptica a la microescala, pasando por la mesoescala. Cada uno de estos procesos debe ser evaluado por los predictores mediante **la utilización del concepto de ingredientes** (Dowell, 1995) que llevan a escena a un determinado tipo de fenómeno convectivo y son opuestos al desarrollo de otros (así, las tormentas eficientes se desarrollan en entornos opuestos a las de tipo severo). Este mismo concepto se puede aplicar a otro tipo de fenomenología (lluvias intensas, llevadas, vientos fuertes, etc).

Vamos a ver cómo se pueden poner en práctica las anteriores ideas junto con **los modelos conceptuales y teorías físicas básicas asociadas a la convección**, tomando como referencia este caso de estudio. En este trabajo vamos a presentar, muy brevemente, las características del tornado, el entorno sinóptico y mesoescalar en que se desarrollaron los acontecimientos tomando como base los datos de 12 Z (7:30 horas antes del tornado), para pa-

sar, y prestar la máxima atención, al análisis de los datos de teledetección con objeto de estudiar la estructura de las células convectivas, tanto en la fase previa a la generación del tornado como en la fase en la que afectó a Sigüenza. La relativa cercanía del sistema convectivo que generó el tornado al radar de Madrid y la disponibilidad de datos volumétricos de este sensor, hacen de este caso uno de los primeros que se pueda estudiar con ciertos detalles significativos. Un trabajo más amplio se puede encontrar en las referencias bibliográficas (Martín, 1995b).

2. El toriiado de Sigüenza

2.1. Características generales

A últimas horas de la tarde del día 24 de mayo de 1993, un tornado afectó a la ciudad de Sigüenza. Según informaciones de campo, tomadas por Miguel Gayá (comunicación personal), el tornado tuvo lugar entre las 19:30 y 19:40 UTC (21:30 y 21:40 hora local), siendo del tipo F1 según escala de Fujita, con un pico de viento máximo estimado que pudo alcanzar los 170 km/h, por lo que correspondería a un tornado de tipo débil (Fujita, 1973). Su movimiento fue de SSW hacia el NNE, prácticamente rectilíneo. Las dimensiones de las zonas dañadas abarcaron no menos de 250 m de diámetro y a lo largo de un corredor de 2-3 km. El terreno rocoso de las zonas que rodean a la ciudad no permitió obtener otra información complementaria muy fiable.

2.2. Elementos del entorno sinóptico y mesoescalar

El ambiente sinóptico previo estuvo caracterizado por una situación de bloqueo que se mantuvo durante varios días bajo el influjo de un potente anticiclón que se situó sobre el Mediterráneo, soportado en niveles altos por una potente dorsal orientada de norte a sur y ubicada en la parte más occidental de dicho mar. Al NW de Galicia aparecía una depresión que quedaba bloqueada en su movimiento por el anterior sistema, Fig. 1.

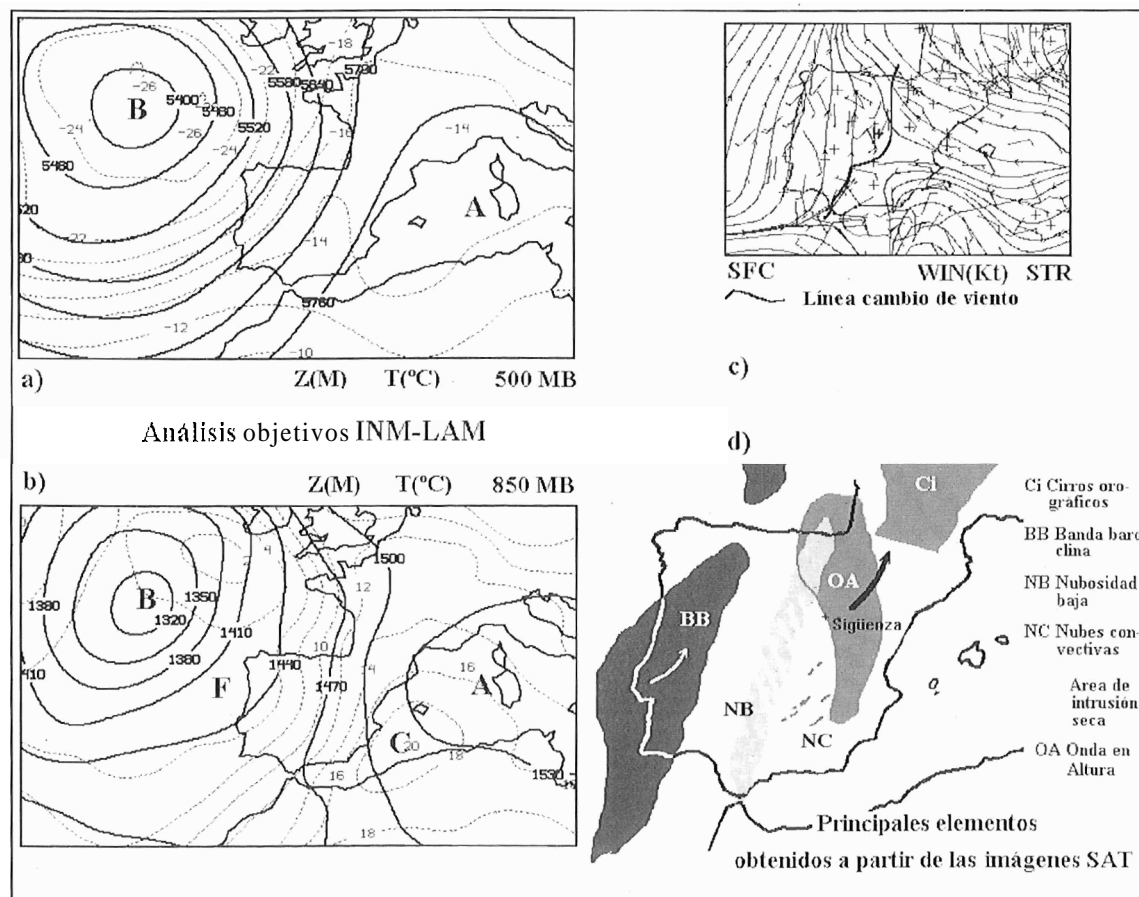


Fig. 1. Análisis de la situación del día 24/May/93 a las 12 Z: a) y b) Análisis objetivo del LAM-INM. c) Viento y líneas de corriente en superficie. d) Principales elementos según imágenes de satélite

Como consecuencia de este efecto de bloqueo, aparecieron varios elementos significativos sobre la Península: un fuerte contraste térmico en niveles bajos (850 y 1 000 mb) y orientado de norte a sur, una advección cálida en la parte oriental de dicha frontera, una zona de mínimos de estabilidad potencial, en forma de lengua muy definida, afectando a toda la parte oriental de dicha discontinuidad térmica, débil o nulo forzamiento dinámico en niveles medios-altos, cizalladura vertical del viento significativa (vientos del S o SE en niveles bajos de 15-20 kt que pasan a SSW de 55-60 kt en niveles superiores). Una línea de cambio de viento se puede dibujar atravesando la Península de norte a sur con una inflexión en la zona centro que era concordante con los sistemas de alta y baja mesoescalares en dicha zona y con el aumento del gradiente del campo de la THW en superficie (resultados obtenidos del análisis objetivo mesoescalar de superficie y no mostrados aquí).

La Fig. 2 nos muestra los sondeos de dos puntos ubicados en la parte occidental (Madrid) y oriental (Zaragoza) de dicha frontera y que nos ponen de manifiesto la diferencia de masas de aire que existe a ambos lados de la frontera (temperatura y, sobre todo, humedad en la vertical) así como la cizalladura vertical del viento. Obsérvese la estructura de «cebolla» que presenta el sondeo de Zaragoza debido a la existencia de una capa seca en niveles bajos mientras que el de Madrid delata la presencia de una capa seca en niveles medios-altos que va a sobrevolar las zonas potencialmente más inestables.

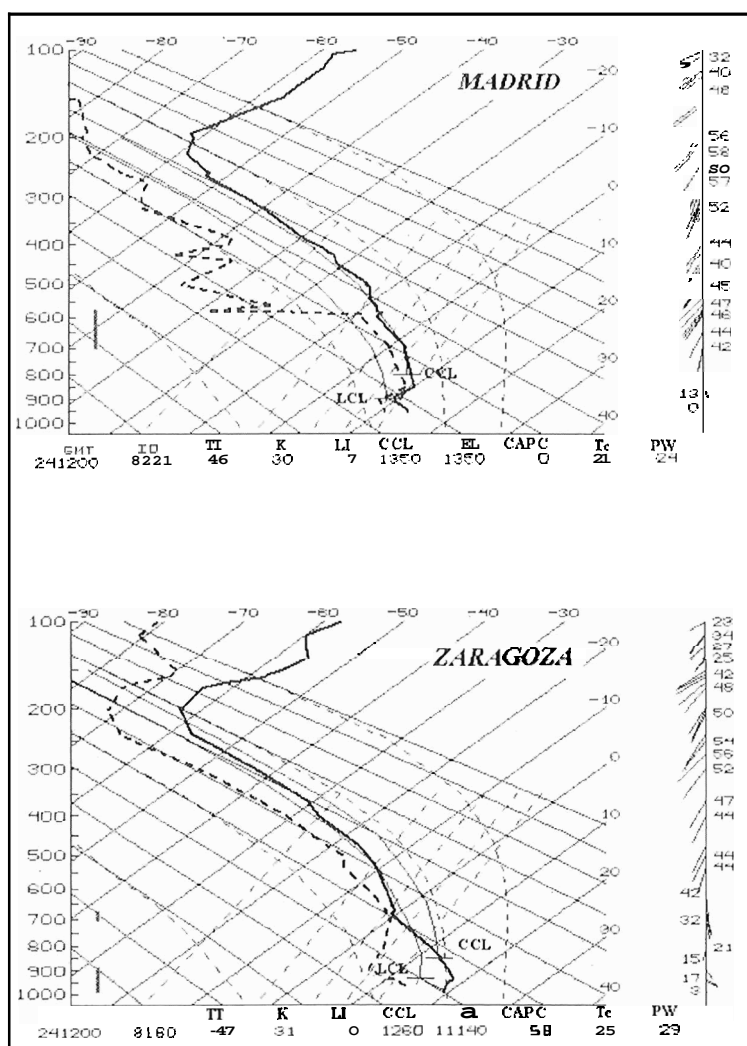


Fig. 2. Sondeos de Madrid y Zaragoza a las 12 Z

2.3. Análisis de los datos de teledetección previos al tornado

Los modelos numéricos operativos nos suministran el marco general donde se pueden desarrollar ciertos fenómenos coactivos. Otros elementos más sutiles que suelen controlar la convección no están reflejados en las salidas numéricas operativas con el grado de precisión espacial y temporal deseado de forma que para varias situaciones similares, según los modelos numéricos, las predicciones, y los fenómenos meteorológicos correspondientes, suelen ser muy distintas y dispares.

Analizando las imágenes de satélite podíamos observar la presencia de una vaguada móvil en altura (imágenes de WV e IR) que atravesaba la Península en las horas diurnas. Estaba caracterizada por la estructura típica y reconocible, con una zona oscura (WV) en su borde trasero, asociada a una entrada relativamente seca en niveles medios-altos. Esta perturbación no estuvo reflejada en las salidas numéricas del LAM de niveles altos (ni previstos, ni en los análisis objetivos más cercanos, 12 Z del día 24 y operativos en aquellos días). El panel inferior derecho de la Fig. 1 trata de presentar «una imagen compuesta» de los principales elementos sobre la Península. OA denota la onda en altura a la que se hizo alusión con anterioridad.

Por otra parte, la actividad tormentosa ya existía antes del mediodía. Estas tormentas se caracterizaron por la presencia anómala de más rayos positivos que negativos. Todos ellos estaban asociados a células convectivas en sus primeras fases de desarrollo. Además estas estructuras tormentosas estuvieron sobrevoladas por la vaguada en altura, y en particular, coincidiendo con el momento del comienzo de la actividad convectiva por la zona relativamente más oscura.

3. Análisis de los datos de radar de Madrid

El radar de Madrid fue un elemento clave para detectar, seguir y evaluar el grado de intensidad y organización de la convección. Recuérdese brevemente que es un radar de banda C (con una longitud de onda aproximada de 5 cm). La anchura del haz es de $0,96^\circ$ y su elevación más baja es de $0,5^\circ$, tanto en modo normal como en modo Doppler y situado al sur de la provincia de Madrid. Hay que resaltar que la zona donde ocurrieron los acontecimientos, respecto al radar, es una área donde el efecto de los ecos de tierra no es muy marcado. Tampoco lo es en cuanto al apantallamiento por obstáculos orográficos, por lo que la cobertura del sistema es relativamente buena. Vamos a pasar a analizar dichos datos.

3.a Detección de los primeros ecos en niveles altos y análisis de sus estructuras

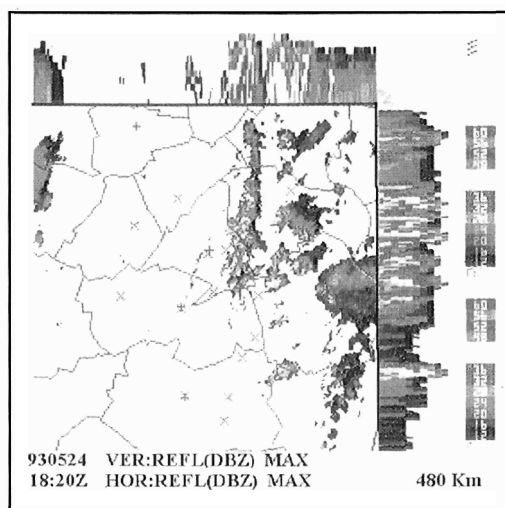


Fig. 3. $Z_{max\ hor}/Z_{max\ ver}$ del radar de Madrid a las 18:20 Z

En este ambiente de inestabilidad, y utilizando como referencia las imágenes del $Z_{max\ hor}/Z_{max\ ver}$ (la llamaremos Z_{MAX} de ahora en adelante) recomendadas en la vigilancia regional, el radar de Madrid comenzó a detectar células intensas pero aisladas sin una organización definida en sus estructuras verticales, todas ellas al este de la cobertura radar. Entre las 17:40-17:50 Z, tanto el Z_{MAX} y el *echotop* muestran la incipiente existencia de ecos organizados en tres líneas paralelas entre sí y orientadas de NNE a SSW, muy próximas al radar.

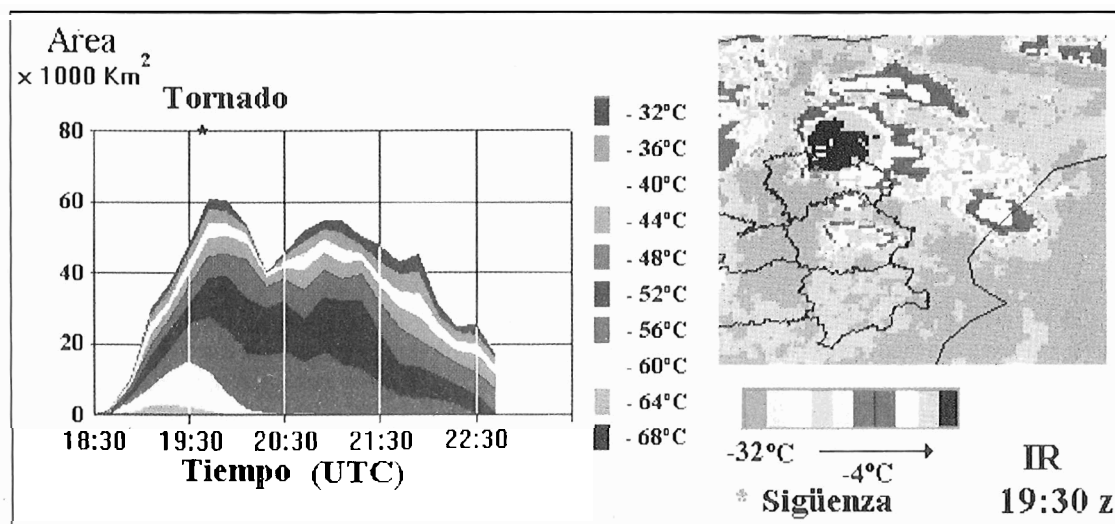
Sobre la línea central y a las 18:20 Z, Fig. 3, comenzaron a desarrollarse núcleos convectivos muy intensos caracterizados por valores muy altos de reflectividad en niveles medios (50 dBZ a más de 5 km de altura sobre las 18:20 a las 18:30 Z), elevados *echotops* (del orden de 13 lun) y mostraron cierto grado de organización.

Las primeras señales potenciales de severidad han aparecido en niveles altos: la coivección es muy profunda e intensa.

3.b Organización de la convección en un Sistema Convectivo de Mesoescala: línea de turbonada

A partir de estos momentos los acontecimientos se suceden de forma explosiva, desde las 18:30 Z a las 19 Z, presentando las siguientes características:

- Las imágenes IR muestran un crecimiento muy rápido y continuado de las áreas nubosas ligadas a los topos más fríos, Fig. 4. La estructura en «V» se adivina en los momentos en que comienza a tener unas dimensiones apreciables.
- Mediante el radar es posible identificar claramente 4 ó 5 núcleos a lo largo de la estructura lineal.



F . 4. Evolución de los topos fríos según datos IR e imagen de las 19:30 Z

El interés debería recaer en detectar su grado de organización y la existencia o no de estructuras de tipo severo (multicélulas, supercélulas, etc), teniendo en cuenta sus modelos conceptuales ligados a la convección vistas por radar.

A las 18:40 Z, el sistema ya tenía unas dimensiones claramente superiores a las de una simple tormenta. A esta hora las dimensiones del sistema, utilizando las señales radar, eran del orden de 10-30 km en la dirección W-E, de 120-150 km en dirección NNE-SSW y se detectaban *echotops* del orden de 13 km. Se había formado y organizado en un Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM, de aquí en adelante) en forma de línea de turbonada, con un desplazamiento hacia el NNE. La zona ligada a la precipitación estratiforme también muestra una expansión en dicha dirección. Los topos de las nubes más frías se expanden con rapidez (dando lugar a la típica estructura en «V», ya mencionada), los rayos positivos asociados llegaron a superar incluso a los negativos en ciertos momentos, aunque en términos absolutos el número total de rayos fue muy bajo.

El hecho de organizarse en línea de turbonada nos debe **hacer** pensar en **que** existan estructuras de tipo **multicelular** embebidas en el sistema. Éste es el siguiente paso que debemos de confirmar.

3.c Detección de la organización de la convección en estructuras de tipo severo dentro del SCM: aplicación del modelo conceptual y cortes específicos verticales

La organización de la convección en estructuras de tamaño superior a una simple tormenta es un elemento importante a la hora de poder producir fenómenos significativos en superficie. Es el radar, en estos momentos, la herramienta fundamental para conocer la estructura tridimensional de las células y, por ello, nos puede ayudar a reconocer ciertos elementos trazadores e indicadores de posible severidad.

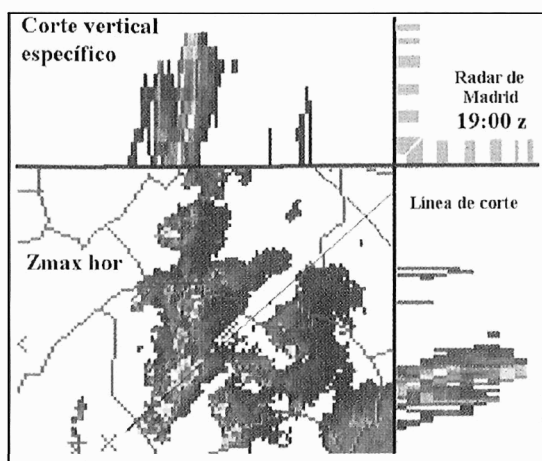


Fig. 5. Detalle del SCM a las 19 Z según radar de Madrid: Zmax hor y corte específico

Volviendo a nuestro caso, los valores más intensos de reflectividad se observan en niveles medios de la troposfera en todas las células como consecuencia de las fuertes corrientes ascendentes que las generan y soportan (> 50 dBZ, primer ingrediente de la convección severa: fuertes corrientes ascendentes). Éstas también repercuten en los *echotops*, que eran más elevados que el resto de las células de alrededor. Estos «murallones» de altas e intensa reflectividad se comportan como verdaderos obstáculos para la señal del radar generando una zona de sombras detrás de ellos y según la radial que los une con el radar (el de Madrid es de banda C y por tanto sensible a los procesos de absorción a los fenómenos convectivos). Estos detalles se pueden ver en el ZMAX de las 19 Z, Fig. 5. Se ha amplificado el detalle de la línea para ponerlo más claramente de manifiesto. La zona ligada a la región de posible lluvia de tipo estratiforme se ve reducida según la radial que une al radar con las distintas células-obstáculos.

Un signo de la posible organización en célula de tipo severo radica en detectar los posibles elementos que las caracterizan mediante el uso de los modelos conceptuales disponibles: zona balconada, región de eco débil, fuerte gradiente de reflectividad en niveles bajos, presencia o no de un mesociclón, etc. Para mayor detalle de estos elementos, véase la bibliografía (Leiiion, 1980; Martín, 1995a y b).

Aunque el ZMAX es una imagen de vigilancia bastante completa, en ciertos momentos y situaciones es preciso realizar cortes específicos determinados con objeto de buscar señales de una mayor organización: región balconada, región de eco débil, estructuras en forma de ganchos, etc. La forma recomendada de hacerlo es aquella que tenga en cuenta la dirección de alimentación de niveles bajos y el flujo de niveles medios-altos. Esto es lo que se ha hecho en la Fig. 5, en la que se aprecian parte de los elementos enunciados con anterioridad: zona balconada, *echotops* elevados, fuertes gradientes de reflectividad, inclinación vertical de los máximos de reflectividad en diferentes niveles.

Desgraciadamente, parte de otras estructuras tienen unas dimensiones tan pequeñas, respecto a la resolución operativa del radar, que no son fácilmente detectables por nuestro sistema, agudizados por las particularidades específicas del tratamiento y presentación de datos: interpolación de los datos volumétricos a un sistema cartesiano de referencia, distancia y tamaño de la traza o estructura a detectar respecto al radar, procesos de absorción de la señal, etc. Éste es el caso de la posible región de eco débil acotado, ganchos verticales y horizontales, etc.

Todo lo anterior nos lleva a la necesidad de **la adaptación de los modelos conceptuales a los sistemas de teledetección operativos**. En nuestro caso será difícil llegar a ver ciertos elementos de pequeña escala característicos de las tormentas severas, sin embargo deberán dejar alguna traza o indicio de su existencia. Como ejemplo de ello es la figura adjunta, Fig. 6 a y b, donde se muestra cómo una estructura multicelular (o posiblemente supercelular) es presentada por el sistema radar de Madrid del INM. Como podemos observar, existen cierta similitudes entre el modelo ideal, Fig. 6b, y la estructura que en un momento determinado detecta y presenta nuestro sistema. Quedan reflejados los valores muy intensos y elevados de reflectividad, altos *echotops*, inclinación de la célula según el viento rector de niveles medios, la presencia de ciertas señales ligadas a la zona balconada. Por contra, otras estructuras serán difíciles de ver: región de eco débil, estructuras en ganchos en la vertical, etc. Respecto a la inclinación de la estructura artificial radar hay que señalar que nuestros sistemas exploran de arriba a abajo de tal forma que la señal que procese de niveles superiores puede estar tomada dos o tres minutos antes de que se realice el PPI más bajo. Si las estructuras se desplazaban hacia el NNE o NE, esto implica que la parte inferior se debió «mover» en tal dirección después que se tomarán los datos de niveles medios-altos de forma que, en realidad, la inclinación real de la célula debió de ser mayor que la que presentaba el sistema radar en la hora nominal dada.

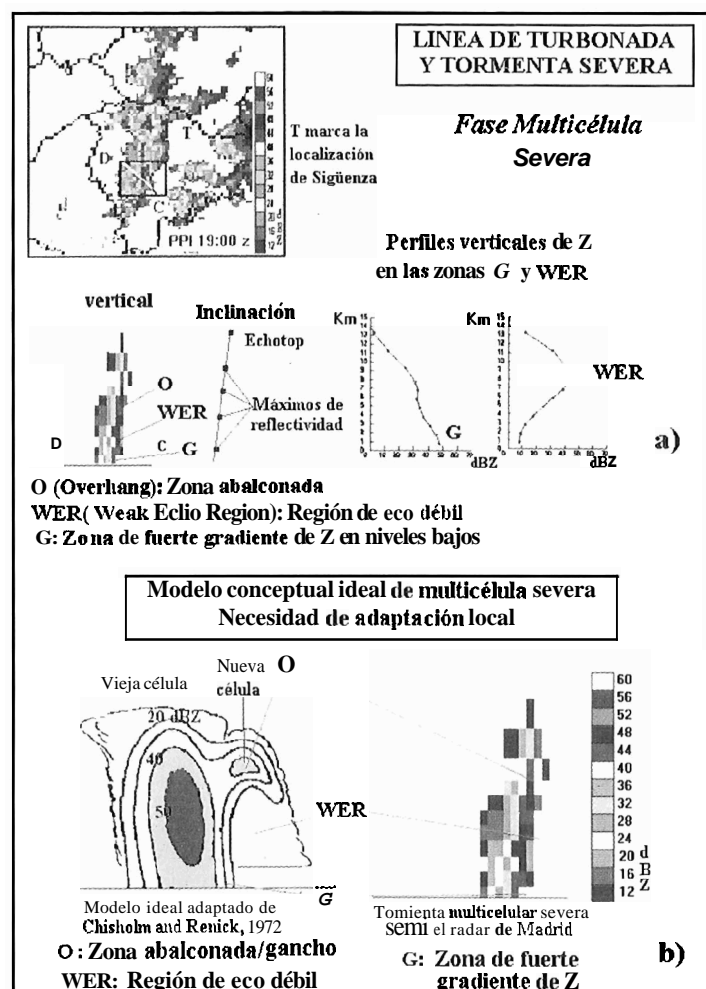


Fig. 6. a) Línea de turbonada y detalles de la célula severa a las 19 Z.
 b) Necesidad de adaptación de los modelos conceptuales

Del estudio detallado de las células que formaban parte del SCM, se puede deducir que todas ellas presentaban unas características muy comunes, ya enunciadas con anterioridad; al menos, todas eran de tipo multicelular y potencialmente severas, hecho ya de por sí importante. La posibilidad de caracterizar las células de tipo supercelular no fue posible por los problemas de resolución enunciados con anterioridad, pero además sería necesario encontrar el elemento que las caracteriza: la presencia de un mesociclón en niveles medios. Desgraciadamente, la no disponibilidad de volúmenes Doppler nos impide la detección de alguna señal asociada a la posible existencia de dicho elemento dentro de las células, siempre y cuando dispongamos de dicho volúmenes y el sistema a analizar caiga dentro de la cobertura adecuada.

3.d Fase de disipación y colapso de la organización celular

En la Fig. 7, podemos ver cómo evolucionó el sistema hasta las 19:30 Z, momentos antes del tornado en Sigüenza. Sabemos que es en la fase disipación, se produce el colapso de alguna de las estructuras multicelulares, cuando el tiempo severo se puede manifestar con toda viulencia en superficie, y en particular la presencia de tornados. Así ocurrió. Sobre las 19:30 Z, la célula situada en el flanco más al sur y una de las que se había mostrado con más actividad en el radar, se encontraba cerca de Sigüenza. Podemos ver cómo evolucionaron ciertos elementos significativos: desaparece su organización en la vertical, los valores elevados de reflectividad pierden altura y se desploman hacia el suelo. Estos hechos ocurrieron minutos antes de que el tomado apareciera en superficie. Hoy ell día no podemos anticiparnos, con seguridad suficiente, a esta fase. De nuevo podría ser el radar Doppler el que nos pudiera dar alguna señal de que la estructura mesociclónica perdiera altura, momentos antes de que el tornado se forme ell superficie si se tratara de una estructura supercelular.

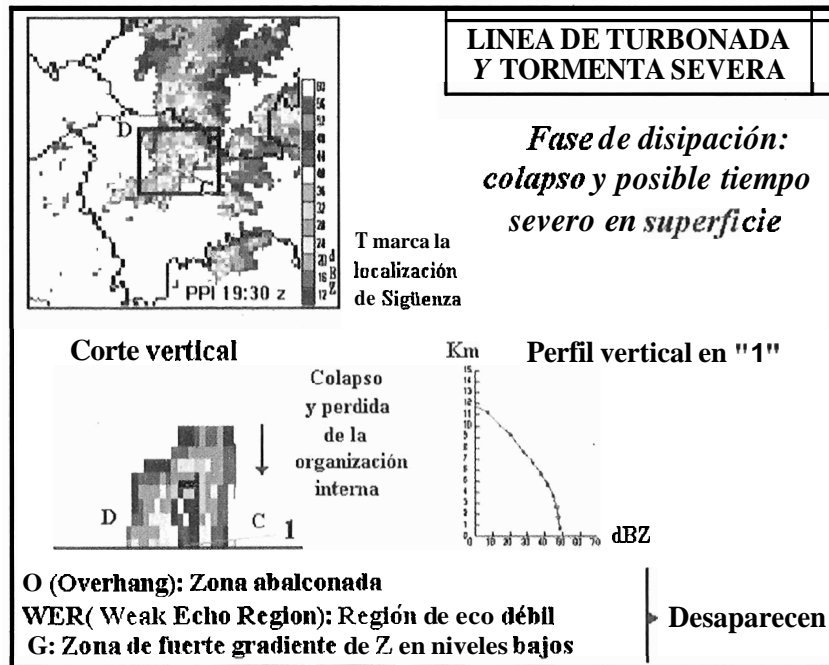


Fig. 7. Colapso de la célula asociada al tornado. Datos de los 19:30 Z

Llama la atención que mucho antes de la aparición del tornado, el número de rayos positivos fue anormalmente alto respecto a los negativos, muy escasos por cierto. Momentos antes de la aparición del tornado la actividad de rayos decayó notoriamente y posteriormente volvió a aparecer con una supremacía de los negativos sobre los positivos. Para una posible explicación de estos hechos véanse las referencias específicas (MacGorman y otros, 1989; Richard, 1992; Martín, 1995b).

4. Conclusiones

La predicción a muy corto plazo de la convección es uno de los mayores retos con los que se enfrentan en la actualidad los predictores. Los modelos numéricos pueden ofrecernos ciertas ayudas a la hora de simular y manejar los ambientes pre-convectivos en los que se puede formar la convección. Desgraciadamente, esos fenómenos están ligados fuertemente a los procesos que ocurren en la capa límite planetaria y son los que peor están reproducidos por los modelos numéricos. Por otra parte, variaciones de 1 ó 2 grados en el campo térmico de niveles medios pueden suponer la existencia o no de la inestabilidad suficiente para el desarrollo de la convección. Elementos como la cizalladura vertical del viento y la estructura vertical de la humedad nos podrían servir como elementos definitorios del tipo de convección que se puede desarrollar. Mientras que el primer parámetro suele estar bien reproducido por los modelos, la humedad es más escurridiza.

Por estos motivos, los datos de teledetección son fundamentales para la anticipación, seguimiento y caracterización de la convección cuando esperemos que se vaya a desarrollar. En este trabajo se ha descrito el papel de cada uno en las diferentes fases del desarrollo de la convección: ambientes pre-convectivo y durante su desarrollo.

Es especialmente significativo el papel de las imágenes de vapor de agua a la hora de evaluar cualitativamente el entorno donde se van a desarrollar las tormentas: ambiente relativamente seco en niveles medios-altos y el aumento de inestabilidad como consecuencia de la entrada de aire con baja temperatura potencial sobre zonas donde el calentamiento diurno es muy significativo.

Se ha enfatizado el papel de los modelos conceptuales a la hora de poder interpretar la gran cantidad de datos con los que tiene que trabajar el predictor, en particular cuando la convección comienza a desarrollarse

mediante el reconocimiento de **cierto** grado de organización tanto a nivel meso-alfa (SCM) y meso-beta o menor (estructura tridimensional de las tormentas de tipo multicelular o supercelular). Es **fundamental** la necesidad de que, en ciertos casos, estos modelos ideales deben de ser adaptados a las herramientas operativas de que dispongamos, como **ha** sido el caso de las estructuras severas observadas por el radar.

Se han recalcado varios hechos fundamentales que pueden repercutir en de las labores diarias como conclusiones operativas:

- El tipo de convección que se puede producir va a depender de un conjunto de elementos que actúan en diferentes escalas y que se acoplan de tal forma que tales ingredientes van a favorecer la aparición de unos y entorpecer la de otros.
- Los modelos conceptuales y las teorías básicas ligadas a la convección son muy útiles para comprender los fenómenos que tienen lugar en la atmósfera.
- La importancia de ciertas herramientas de uso diario (modelos numéricos, datos de teledetección, etc.) en las labores de predicción y seguimiento de ciertos fenómenos dependen de la fase en que nos encontremos con relación a dicho fenómeno: su predicción, detección, seguimiento, evaluación de su impacto social, etc. Este caso nos pone de manifiesto cuál podía haber sido el peso de cada una de las herramientas hoy en día disponibles, en las distintas fases del desarrollo de la convección.

No hay que olvidar que este tipo de situaciones no se presentan, a un mismo predictor, con mucha frecuencia en su vida operativa, de forma que el grado o agilidad subjetiva de poner todos los elementos del puzzle en concordancia para explicar y evaluar lo que ocurre en la atmósfera es una tarea que puede resultar difícil. Además, y teniendo en cuenta que el espectro de los fenómenos convectivos es uno de los mayores que existen en la atmósfera, es necesario objetivizar estos procesos: normalización de métodos y toma de decisiones, el reconocimiento objetivo de estructuras, la evaluación objetiva de ciertas trazas de severidad, etc. Éste es uno de los retos que se le presenta a la comunidad meteorológica en los años venideros.

Referencias

Fujita, T. T., 1973: *Tornadoes around the World*. *Weatherwise* 26, 56-62, 78-83.

Doswell, C. A.; H. E. Brooks and R. A. Maddox, 1995: *Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology*. *Fifth Workshop on Operational Meteorology*. AES/CMOS. Edmonton, Alberta, 28/Feb-3/Mar 1995.

Lemon, L. R., 1980: *Severe thunderstorm radar warning techniques and warning criteria*. NOAA Tech. Memor. NWS NSSFC-3, U. S. Department of Commerce, 66 pp.

Martin, F. y R. Riosalido, 1995a: *Modelos conceptuales de tormentas visto por radar. Módulos de enseñanza asistida por ordenador (TEMPO)*. STAP. INM.

Martín F.; L. de Esteban y R. Riosalido, 1995b: *Estudio del Tornado de Sigüenza. Análisis de los ingredientes para la formación de tornzentas severas*. Nota Técnica del S.T.A.P. Núm. 24, Madrid, INM.

MacGorman, D. R.; D. W. Burgess; V. Mazur; W. D. Rust; W. L. Taylor and B. C. Johnson, 1989: *Lightning rate relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981*. *J. Atmos. Sci.*, 46, 221-250.

Richard, P., 1992: *Severe Thunderstorm nowcasting: Example of tornadic storm observed with a total lightning detection system (SAFIR)*. *Technical conference on tropical aerounautica Meteorology*. WMO, No. 785.